

多関節自己受容感覚課題における誤差に対して腕スティフネスが与える影響 —頭頂葉損傷患者と健常者の比較—

板口典弘

概要書

本研究の要約

本研究では、身体感覚の予測の向上あるいは適切な評価を行うため、制御対象の器械的要素、およびその運動に付随する誤差の要素を明らかにすることを目的とした。具体的には、多関節腕を用いた自己受容感覚課題において腕の要素あるいは運動要素が誤差に与える影響を検討した。自己受容感覚課題として、健常者を対象に、片腕を用いた自己受容感覚定位課題（実験 1）、両腕を用いた自己受容感覚定位課題（実験 2、実験 3）を行った。さらに、頭頂葉損傷患者を対象とした片腕を用いた自己受容感覚定位課題（実験 4）を行った。これらの解析に際して、腕の要素あるいは運動要素として、腕スティフネス特性の幾何学的表現であるスティフネス楕円体を終点誤差（終点分布とバイアス）の予測指標として用いた。

実験の結果、以下のことが明らかになった。片腕を用いた課題の結果、重力に抗して腕を水平に保つための筋出力が水平方向の終点分散およびバイアスを減少させた。また、スティフネス楕円体の短軸方向に終点分散が大きかった。両腕を用いた課題の結果、記憶処理を用いない条件では、知覚に用いる腕ではなく定位に用いる腕のスティフネス楕円体の短軸方向へ終点分散は小さかった。一方、記憶処理を必要とする条件では、このようなスティフネス楕円体の軸方向に関する終点分散の差は見られなかった。さらに、健常者と頭頂葉損傷患者の課題成績を定量的に比較した結果、臨床検査において位置感覚障害があると診断された患者においても、単純に終点の精度および確度のみを比較すると健常者の範囲内であること、および終点到達までの運動要因に健常者からの逸脱が多く見られることを示した。

これらの知見は、腕特性であるスティフネスが多関節腕の手先位置の内部表現、および自己受容感覚定位の終点誤差パターンに反映されることを示唆する。すなわち、制御対象の運動要素が感覚課題の成績の予測指標となることを示した。この結果は同時に、知覚する腕の自己受容感覚を反映すると暗に仮定されてきた課題において、むしろ運動する腕の要素に起因する誤差が大きく課題の誤差パターンに反映されるという、方法論的な問題点を示している。実際に、健常者と頭頂葉損傷患者の課題成績を定量的に比較した結果からも、臨床検査において診断される“位置感覚”が実際はそれ以外の運動要因によって引き起こされている可能性が示唆された。

各章の構成

第1章 序論

本研究の要約や、自己受容感覚課題において腕の運動や物理的要素を検討することの学術的・臨床的意義を示した。学術的な意義として、感覚の側面のみに焦点が当てられてきた既存のパラダイムを感覚・運動の相互作用という点から捉え直す点、および運動制御理論において重要な変数（スティフネス）を導入する点が挙げられる。臨床的な意義として、神経心理学における既存の検査法に対しての妥当性および信頼性の理論的検証、および裏付けを提供し、さらに頭頂葉損傷患者についての今まで知られてこなかった新たな臨床像をもたらすことが挙げられる。

第2章 研究史と問題提起

本研究の基盤となる神経学的・解剖学的・実験的事実や感覚運動に関する計算理論を踏まえ、そこから本研究の発端となる問題提起をおこなった。具体的には、自己受容感覚の定義や脳部位対応、従来の実験的・臨床的評価法、スティフネスに関する計算理論を概観し、従来の研究や臨床検査の問題点を指摘した。さらに、それらの先行研究を基に、腕スティフネスが自己受容感覚を用いた課題における終点誤差を予測指標になる可能性、およびその腕スティフネスを考慮することによりこれまで以上に妥当性のある自己受容感覚の検査法が行える可能性を述べた。

第3章 目的と仮説

本研究の目的を明示し、本研究で検討する仮説とその導出背景を示した。また、その仮説検証を達成するための技術的背景を述べた。本研究の目的は、多関節腕を用いた自己受容感覚課題において腕の要素あるいは運動要素が誤差に与える影響を明らかにすることである。さらに、自己受容感覚障害の脳部位対応、および臨床・実験場面における自己受容感覚課題の妥当性について総合的な考察を試みることも目的とした。研究全体を通した主要な仮説は、「自己受容感覚課題において、手先位置の運動知覚に関する誤差分散はスティフネス楕円体の形と反比例する」であった。

第 4 章 腕スティフネスが定位誤差に対して与える影響（実験 1）

第 4 章（実験 1）の目的は、スティフネス楕円体におけるスティフネスの高低、および重力に抗して姿勢を水平に保つために必要な筋出力という 2 つの要因が、肩水平面の自己受容感覚課題の誤差に与える影響を調べることである。具体的には、仮説 1「自己受容感覚課題において、手先位置の運動知覚に関する誤差分散はスティフネス楕円体の形と反比例する」、および仮説 2「重力下において水平腕姿勢を保つための筋出力が水平方向の終点誤差（終点分散とバイアス）に影響を与える」を検証した（仮説 2）。

健常者 12 名を対象とし、他動的に提示された指先の位置を記憶し、同側の腕を用いて記憶したターゲット位置にできるだけ精確に指先を定位する課題(Ipsilateral remembered task)を行った。課題は肩の平面、閉眼状態で行われた。被験者はターゲットの知覚および定位を自己受容感覚のみを頼りに行った。腕の筋出力状態に関して、3 つの実験条件を設けた。代表的な 2 人の被験者の終点および終点分布に対する主成分分析による楕円近似を Figure 4-3 に示す（Figure の番号は本論文の番号に依拠する）。

実験の結果、2 つの仮説は支持された。終点はスティフネス楕円体におけるスティフネスの低い方向への分散が大きく、かつ、重力に抗するための筋出力は水平方向の 2 つの終点誤差（Variable error：終点分散と Constant error：終点バイアス）を減らした。

これらの結果は、2 次元上の腕のスティフネス特性が、知覚と定位の誤差を予測する指標となること、および、重力下の腕スティフネスが知覚や定位にとって最適な状態であることを示唆する (Itaguchi & Fukuzawa, 2012a)。

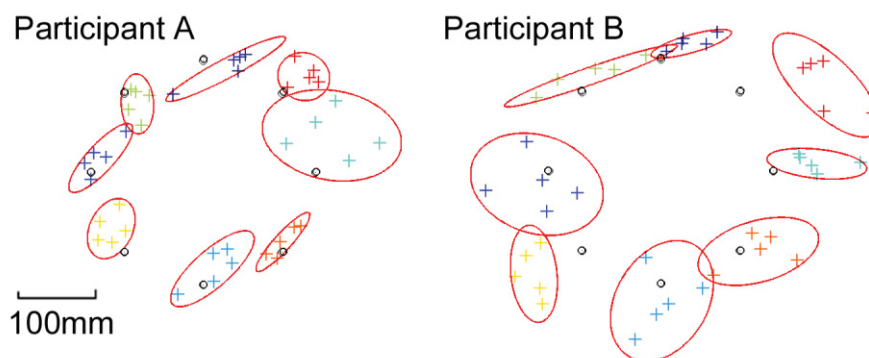


Figure 4-3 代表的な被験者 2 名の Best-fit ellipse. +: 終点. 同じターゲットに対する終点は同じ色で描いた. 赤い楕円は Best-fit ellipse を示す.

第5章 運動肢と参照肢スティフネスが定位誤差に対して与える影響の違い (実験2・実験3)

第5章(実験2・実験3)の目的は、両腕のスティフネス楕円体が自己受容感覚課題の終点誤差に与える影響の相互作用を調べることである。実験2と実験3では、仮説1「自己受容感覚課題において、手先位置の運動知覚に関する誤差分散はスティフネス楕円体の形と反比例する」を引き続き検討する。具体的には、仮説1が参照肢(位置知覚に用いられる腕)・運動肢(定位に用いられる腕)の両方の腕において生じているという、より一般的な予測を仮説3として検証する。

健常者(実験2:18名, 実験3:14名)を対象とし、他動的に提示された指先の位置に、それとは反対側の腕を用いてターゲット位置にできるだけ精確に指先を定位する課題を行った。実験2では、記憶したターゲットに定位を行い(Contralateral remembered task), 実験3では記憶をせずに、今ある指先の真上/真下に定位を行った(Contralateral concurrent task)。他の基本的な方法は実験1と変わらなかった。Figure5-4にそれぞれの課題における近似楕円とスティフネス楕円体の軸との関係を図示する。

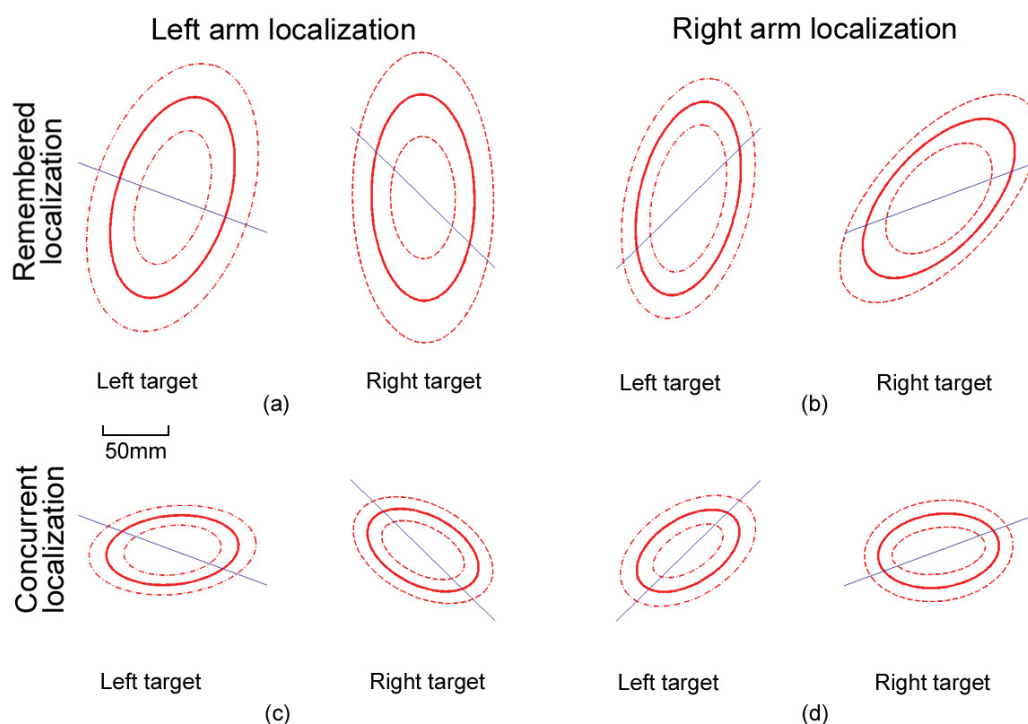


Figure 5-4 Pooled best-fit ellipse. (a) 左腕での Remembered localization, (b) 右腕での Remembered localization, (c) 左腕での Concurrent localization, (d) 右腕での Concurrent localization. 赤い実線の楕円が best-fit ellipse, 点線がその ± 1 標準偏差を示す。青い直線がスティフネス楕円体の短軸の傾きを表す。

実験の結果、仮説 3 は部分的に支持された。Contralateral concurrent task における定位終点は、運動肢のスティフネス楕円体に基づいたスティフネスの方向へ分散が大きく、Contralateral remembered task では、どちらの腕のスティフネスを基準とした時も軸方向の分散に差は見られなかった。また、Contralateral remembered taskの方がContralateral concurrent taskよりも終点分散のサイズが大きかった。

これらの結果は、少なくとも位置表現の曖昧さが記憶処理により増大した状況では、運動肢と参照肢を起源とするノイズは、スティフネス楕円体の形と反比例する形であることを示唆する。また、記憶処理に伴うノイズは、終点分散にのみ影響することおよび半球間統合処理に伴うノイズよりも大きいことが示唆される(Itaguchi & Fukuzawa, 2012b)。

第 6 章 総合考察

第 4 章、第 5 章における研究結果を総括し、理論的示唆や方法論的示唆を示した。特に、終点誤差とスティフネス楕円体に関する結果として、以下の知見が得られた。終点分散に関しては、

- 1) 片手継時定位 (Ipsilateral Remembered: 以下 IR 課題)では、スティフネス楕円体の短軸方向に分散が大きかった
- 2) 両手継時定位 (Contralateral Remembered: 以下 CR 課題)では、スティフネス楕円体の軸要素に関する有意な影響はなかった
- 3) 両手同時定位 (Contralateral Concurrent: 以下 CC 課題)では、スティフネス楕円体の短軸方向に分散が大きかった。

また、終点バイアスに関しては、

- 1) IR 課題では、全てのターゲットに一貫したバイアスは見られなかった。
- 2) CR 課題・CC 課題では、課題の種類に関係なく、運動肢から遠い位置に定位する Overlap effect (Crowe, et al., 1987)が見られ、および遠位のターゲットと近位のターゲットではバイアスの角度が異なっていた。

これらの結果から、理論的示唆として、参照肢、運動肢に起因する終点の分散とバイアスが、どちらもスティフネス楕円体の特性を反映している可能性に関する議論をおこなった。さらに課題の方法論的な示唆として、自己受容感覚課題において、運動肢の要素が誤差パターンに反映されること、および条件によってはその反映のされ方が参照肢の要素よりもむしろ大きくなりうることを示した。

具体的な理論的な議論として、既に本研究で提案されているモデルを用いて以下のよ

うな示唆を得た。まず、終点の分散は参照肢，運動肢由来のノイズを足しあわせたものとなっていること，それらノイズの分布はそれぞれの腕のスティフネス楕円体に反比例する形を取っていること，および，記憶保持など認知的要因によるそれらのノイズの相対的大きさの変化が最終的な終点分散の形を変化させることを示唆した。次に，同様のスティフネス楕円体と反比例する内部表現に加え，運動方向に関するバイアス（オーバーシュート）を設定することで，終点バイアスの位置および大きさが説明できることを示した(Figure 6-1)。

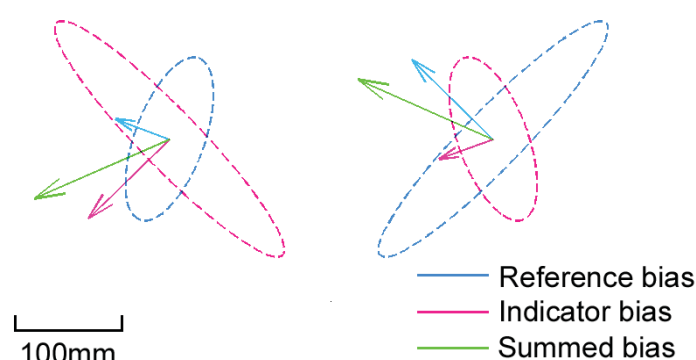


Figure 6-1 参照肢と運動肢のバイアスのモデル。青い楕円は参照肢，赤い楕円は運動肢のスティフネス楕円を表す。矢印はそれぞれの腕に基づいたバイアスを表し，緑色のバイアスは参照肢と運動肢のバイアスを足したものである。ここでのバイアスの大きさは，楕円体の形に比例した大きさとし，バイアスの方向はスティフネス楕円体の短軸方向と一致する。

具体的な方法論的な示唆としては，自己受容感覚課題において，運動肢の要素が誤差パターンに反映されること，および条件によってはその反映のされ方が参照肢の要素よりもむしろ大きくなりうることを示した。この結果は，自己受容感覚課題に関して暗に仮定されてきた前提を否定する。その前提とはすなわち，自己受容感覚的に提示されたターゲットに対する定位もしくはマッチング課題は，参照肢の自己受容感覚を反映するというものである。誤差パターンに運動肢の影響が含まれる可能性は最近の先行研究からも示唆されているが，参照肢よりも運動肢の影響の方が誤差パターンに反映される可能性を実際に示したのは本研究が初めてである。

第7章 頭頂葉損傷患者と健常者の定位誤差に対する定量的比較（実験4）

これまでの章で得られた知見をもとに，頭頂葉領域損傷患者と健常者の定量的比較を行った。具体的には，頭頂葉領域を病変に含む患者7例（ 57 ± 11.6 歳）を対象として，

Ipsilateral remembered task を行った (実験 4)。7 例のうち、位置感覚の喪失あるいは低下を呈した者は 5 例であった。そのうちの 5 例ともが臨床における位置感覚検査である母指探し試験で成績低下を見せた。

患者と健常者の感覚運動機能の定量的比較は、従来の臨床検査法では明らかにされてこなかった患者の新たな臨床像を浮き彫りにした。具体的には、臨床検査で位置感覚が障害あると評価された症例においても定位の正確さや精度は若年健常者の誤差の範囲内であるケースがあることや、最終的な終点よりもむしろ定位運動に健常者とは異なる特徴が見られることが明らかとなった。

定量的な指標と病変部位との比較結果は、中心後回を病変に含む症例は、含まない症例よりも探索傾向が強いことや、下頭頂葉前部病変が、なんらかの位置感覚表現・処理の障害をもたらすことを示唆した。さらに、本結果は、従来の臨床検査を用いた評価は、手先位置の表現の正確さや精度をそのまま反映するものではないことも示唆した。本研究で得られた知見は、患者の診断評価やリハビリテーションを進めるにあたり、考慮すべき重要な基礎資料である (板口・吉澤・内山・村西・福澤, 2012)。

引用文献

- Itaguchi Y & Fukuzawa K (2012a) Effects of arm stiffness and muscle effort on position reproduction error in the horizontal plane. *Percept Mot Skills* 114: 757-773
- Itaguchi Y & Fukuzawa K (2012b) The influence of the indicator arm on endpoint distribution in proprioceptive localization with multi-joint arms. *Exp Brain Res* 222: 77-88
- 板口典弘・吉澤浩志・内山由美子・村西幸代・福澤一吉 (2012) 頭頂葉領域損傷患者の位置感覚の定量的評価. *神経心理学* 28: 274-282